

การทำนายคุณภาพของฝรั่งแบบไม่ทำลายโดยใช้ภาพไฮเปอร์สเปกตรัมแสงย่านใกล้
อินฟราเรด
Non-destructive prediction of guava's qualities using NIR hyperspectral
imaging

ณัฐสินี กลิ่นบำรุง
NUTSINEE KLINBUMRUNG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร
คณะอุตสาหกรรมอาหาร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2563

KMITL-2020-AI-M-053-355

การทำนายคุณภาพของฝรั่งแบบไม่ทำลายโดยใช้ภาพไฮเปอร์สเปกตรัมแสงย่านใกล้
อินฟราเรด
Non-destructive prediction of guava's qualities using NIR hyperspectral
imaging

ณัฐสินี กลิ่นบำรุง
NUTSINEE KLINBUMRUNG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร
คณะอุตสาหกรรมอาหาร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2563
KMITL-2020-AI-M-053-355

NON-DESTRUCTIVE PREDICTION OF GUAVA'S QUALITIES USING
NIR HYPERSPECTRAL IMAGING

NUTSINEE KLINBUMRUNG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE PROGRAM IN FOOD SCIENCE
FACULTY OF FOOD INDUSTRY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2020

KMITL-2020-AI-M-053-355

COPYRIGHT 2020

FACULTY OF FOOD INDUSTRY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายคุณภาพของฝรั่งแบบไม่ทำลายโดยใช้ภาพไฮเปอร์สเปกตรัมแสงย่านใกล้อินฟราเรด
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ญัฐสินี กลิ่นบำรุง
รหัสนักศึกษา	60608012
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยุติ

บทคัดย่อ

ดัชนีคุณภาพในการคัดเลือกฝรั่งซึ่งจะส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค ประกอบด้วย ค่าความเป็นกรดที่ไตเตรทได้ (TA), ปริมาณที่ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) และความแน่นเนื้อ (firmness) ของฝรั่งที่เป็นดัชนีคุณภาพที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการยอมรับของผู้บริโภคในการตรวจสอบคุณภาพ การทดลองนี้จึงใช้เทคนิค near infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) แบบสะท้อนกลับ ในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตร ซึ่งเป็นเทคนิคแบบไม่ทำลายมาถูกทดสอบเพื่อใช้ทำนาย ระดับความเป็นกรดที่ไตเตรทได้ (TA), ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) และความแน่นเนื้อ (firmness) โดยใช้ตัวอย่างเป็นฝรั่งพันธุ์แป้นสีทองและทำการสแกนโดย NIR-HIS และทำการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มสำหรับสร้างสมการสอบเทียบและเป็นกลุ่มสำหรับการทำนายโดยทำการวิเคราะห์จาก ค่าสเปกตรัมเฉลี่ยที่น่าสนใจ (ROI) ของตัวอย่างถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองการสอบเทียบในการทำนายระดับความเป็นกรดที่ไตเตรทได้ (TA), ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) และความแน่นเนื้อ (firmness) ทำการทดสอบสมการจากการวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (PLSR) เพื่อสร้างแบบจำลองการสอบเทียบ ซึ่งผลวิเคราะห์ที่ได้ในการทำนายระดับความเป็นกรดที่ไตเตรทได้ (N=100) ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.972 และความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) 0.010% ในส่วนของการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (N=100) ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.801 และความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) 0.437°Brix และในการทำนายความแน่นเนื้อ (N=138) ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.747 และความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) 0.610 N จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่าเทคนิค near infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) มีความเป็นไปได้ในการตรวจสอบและมีศักยภาพที่จะใช้ในการวัดคุณภาพของฝรั่งแบบไม่ทำลาย คำสำคัญ: การสอบเทียบ, การทำนาย, ใกล้อินฟราเรด, แบบจำลอง, แบบไม่ทำลาย

Thesis title	Non-destructive prediction of guava's qualities using NIR hyperspectral imaging
Student name	Nutsinee Klinbumrung
Student ID	60608012
Degree	Master of Science
Program	Food Science
Year	2020
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Sontisuk Teerachaichayut

ABSTRACT

In order to sort good qualities of guava, titratable acidity (TA), total soluble solids (TSS) and firmness of guavas as important indices that influence the acceptance of consumers were considered. Therefore reflectance near infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) in the wavelength of 900-1700 nm which is a non-destructive technique was used to predict TA, TSS and firmness of guavas in this study. Guavas were scanned by NIR-HIS and divided into 2 groups for calibration and prediction. Average spectrum from a region of interest (ROI) of each sample from NIR-HSI was used to create calibration models to predict TA, TSS and firmness. The calibration models were established using the partial least squares regression (PLSR). The prediction results obtained the coefficient of determination (R^2) of 0.972 and the root mean squared error of prediction (RMSEP) of 0.010% for TA, R^2 of 0.801, RMSEP of 0.437 °Brix for TSS and R^2 of 0.747, RMSEP of 0.610 N for firmness. Hence, the near infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) technique was feasible and had the potential to be used to measure the qualities of guavas.

Keywords: calibration, prediction, near-infrared, model, non-destructive.

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาวิทยานิพนธ์ เรื่องการทำนายคุณภาพของฝรั่งแบบไม่ทำลายโดยใช้ภาพไฮเปอร์สเปกตรัมแสงย่านใกล้อินฟราเรด เพื่อต้องการศึกษาการทดสอบและประเมินการทำนายคุณภาพทางภายในและทางกายภาพแบบไม่ทำลายของฝรั่งโดยใช้เทคนิค NIR hyperspectral imaging

ในการศึกษาวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณหลายท่าน คือ รศ.ดร. สนธิสุข อธิระชัยชยุติ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาแนะนำแนวทางต่าง ๆ ในการศึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าและช่วยให้คำปรึกษาการทำรูปเล่มในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกและให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้ดียิ่งขึ้นไป

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อพัชชา จินดาประเสริฐ, ผศ.ดร.โสธยา เกิดพิบูลย์ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้ดียิ่งขึ้นไป

ขอกราบขอบพระคุณ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ ครอบครัวของผู้จัดทำและเพื่อนๆผู้จัดทำ ที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือหวังใย ดูแลให้กำลังใจด้วยดียิ่ง จนการนำเสนอวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ณัฐสินี กลิ่นบำรุง

19 พฤศจิกายน 2562

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ฝรั่ง.....	3
2.2 หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้.....	8
2.3 NIR hyperspectral imaging.....	12
2.4 ทฤษฎีการตรวจสอบคุณภาพทางเคมีและทางกายภาพ.....	12
2.5 ค่าทางสถิติ.....	13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณภาพของผลไม้โดยวิธีไม่ทำลาย.....	14
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	16
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	16
3.2 อุปกรณ์.....	16
3.3 โปรแกรมที่วิเคราะห์ทางสถิติ.....	16
3.4 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	16
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	19
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับตัวแปรต่างๆ.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การสร้างสมการในการทำนายการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity)	24
4.3 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids)	27
4.4 การสร้างสมการในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness)	30
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	33
5.1 สรุปผลการวิจัย	33
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	33
บรรณานุกรม	34
ภาคผนวก	37
ภาคผนวก ก.....	38
ภาคผนวก ข.....	40
ประวัติผู้เขียน	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณคุณค่าทางโภชนาการของฝรั่ง.....	3
2.2 ช่วงคลื่นแม่เหล็กย่านอินฟราเรด	9
2.3 เกณฑ์การพิจารณาความหมายของค่า R^2	14
4.1 ค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity).....	24
4.2 ความแม่นยำสำหรับการสร้างสมการในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity) ด้วยวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตรด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ ต่าง ๆ	24
4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity)	25
4.4 ค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids).....	27
4.5 ความแม่นยำสำหรับการสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) ด้วยวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตรด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ	27
4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids).....	28
4.7 ค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness).....	30
4.8 ความแม่นยำสำหรับการสร้างสมการในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) ด้วยวิธีการ ปรับแต่งสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตรด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ	30
4.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness)	31

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะทั่วไปของฝรั่ง	4
2.2 ลักษณะของฝรั่งพันธุ์แป้นสีทอง.....	6
2.3 ลักษณะของฝรั่งพันธุ์ไร้เมล็ดหรือสาเลีทอง.....	6
2.4 ลักษณะของฝรั่งพันธุ์กลมสาเลี.....	7
2.5 ลักษณะของฝรั่งพันธุ์เงินจูหรือกิมจู.....	7
2.6 ช่วงความยาวคลื่นของ near infrared spectra ที่อยู่ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
4.1 ค่าสเปกตรัมจากเครื่อง NIR hyperspectral imaging โหมด reflectance ในช่วงความยาว คลื่น 900-1700 นาโนเมตร	19
4.2 ค่าสเปกตรัมที่ทำการปรับสภาพด้วยอนุพันธ์อันดับสองของฝรั่ง	20
4.3 กราฟค่าการดูดกลืนแสงของกลุ่มฝรั่งโดยดูจากปริมาณกรดที่ไตเตรทที่มีปริมาณกรดต่ำกับ ปริมาณกรดสูง.....	21
4.4 กราฟค่าการดูดกลืนแสงของกลุ่มฝรั่งโดยดูจากปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำที่มีปริมาณของแข็ง ที่ละลายน้ำต่ำกับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง.....	22
4.5 กราฟค่าการดูดกลืนแสงของกลุ่มฝรั่งโดยดูจากค่าความแน่นเนื้อของฝรั่งที่มีค่าความแน่นเนื้อต่ำ กับ ค่าความแน่นเนื้อสูง.....	23
4.6 แผนการกระจายในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรท (titratable acidity) ได้ในกลุ่มสร้างสมการ (a) และในกลุ่มทดสอบสมการ (b).....	26
4.7 แผนการกระจายในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) ได้ในกลุ่มสร้างสมการ (a) และในกลุ่มทดสอบสมการ (b).....	29
4.8 แผนการกระจายในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) ในกลุ่มสร้างสมการ (a) และในกลุ่มทดสอบสมการ (b).....	32

สัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ

Average	=	ค่าเฉลี่ย
F	=	จำนวนแฟกเตอร์ของสมการ PLSR
N	=	จำนวนตัวอย่าง
nm	=	หน่วยวัด นาโนเมตร
PLS	=	วิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least squares method)
PLSR	=	การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสถิติ (partial least squares regression)
R ²	=	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination)
RMSEC	=	ความน่าเชื่อถือของการประมาณการโดยใช้ regression (root mean square error of calibration)
RMSECV	=	ความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (root mean square error of cross validation)
RMSEP	=	ค่าผิดพลาดในการทำนาย (standard error of prediction)
SD	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)
SEC	=	ความผิดพลาดมาตรฐานของการจำลอง (standard error of calibration)
SEV	=	standard error of validation
SNV	=	standard normal variate
NIRS	=	near infrared spectroscopy
TSS	=	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solid)
TA	=	ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titrable acidity)
Smoothing	=	Savitzky-Golay smoothing
1 st derivative	=	Savitzky-Golay first derivative
2 nd derivative	=	Savitzky-Golay second derivative
MSC	=	multiplicative scatter correction pretreatment

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผลไม้ของไทยนั้นได้รับความนิยมทั้งในประเทศและต่างประเทศ ส่งผลให้ประเทศไทยมีรายได้หลายพันล้านบาทต่อปี โดยฝรั่งจัดเป็นผลไม้ที่มีความนิยมบริโภค ประเทศไทยมีการส่งออกฝรั่งจำนวน 5900, 6400 และ 6,625 ตัน ในปีพุทธศักราช 2558, 2559 และ 2560 ตามลำดับ ซึ่งในปีพุทธศักราช 2560 มีการส่งออกฝรั่ง เป็นมูลค่า 147 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจและการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560) แม้ว่าประเทศไทยจะเป็นผู้ส่งออกของฝรั่งรายใหญ่ แต่ในปัจจุบันมีการแข่งขันที่เพิ่มขึ้นการส่งออกจึงมีการเน้นที่คุณภาพควบคู่ไปกับปริมาณ ทำให้การส่งออกผลไม้มีการมุ่งเน้นคุณภาพสูงมากกว่าในอดีต และการเก็บรักษาคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการตรวจสอบคุณภาพเบื้องต้นมักมีการตัดสินจากรูปร่างภายนอกพร้อมกับรสชาติของผลไม้

ก่อนหน้านี้นี้มีรายงานว่าการนำเทคนิคการดูกลืนพลังงานย่านใกล้อินฟราเรดแบบดั้งเดิมในการประเมินคุณภาพของผลไม้หลายชนิด ได้แก่ การประเมินคุณภาพทางโภชนาของฝรั่ง (ดลพร, 2555) การตรวจสอบคุณภาพภายในของมะขามหวานแบบไม่ทำลาย (สินีนารถ, 2556), การทำนายระดับความสุกแก่ของเนื้อทุเรียน (วรศักดิ์, 2558), การตรวจสอบคุณภาพของมะยงชิดพันธุ์ทุลเกล้า (สดุดี, 2558)

งานล่าสุดมีการนำ เทคนิค NIR Hyperspectral Imaging ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ที่ใช้วิเคราะห์ภาพ (image analysis) มาร่วมใช้วิเคราะห์ควบคู่ไปกับการวิเคราะห์การดูกลืนพลังงานแสงย่านใกล้ของอินฟราเรดของตัวอย่าง (Teerachaichayut and Ho, 2017) มีการนำเทคนิค NIR Hyperspectral Imaging มาพิจารณาความหวานและความแน่นของแตงโม (Meijun et al., 2017) สี ความแน่นและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของลูกพลัม (Bo et al., 2018) และความแน่นเนื้อของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและกรดที่ไต่เตรทได้ของมะม่วง (Rungpichayapichet et al., 2017)

จากมูลค่าการส่งออกของฝรั่งดังกล่าวมาพบว่ายังประสบปัญหาในการคัดเลือกที่มีคุณภาพและมาตรฐานที่แน่นอน โดยทั่วไปจะพิจารณาภายนอกโดยอาศัยผู้ที่เชี่ยวชาญ แต่ก็อาจจะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ผู้จัดทำจึงศึกษาและพัฒนาด้านเทคโนโลยีของภาคอุตสาหกรรมและการส่งออกก่อนการจำหน่ายสู่ผู้บริโภคให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและวิธีนี้สามารถทำได้โดยไม่ต้องทำลายวัตถุดิบ โดยอาศัยข้อมูลทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของฝรั่ง นำมาสร้างสมการทำนายคุณภาพภายในตามที่คุณผลิตในภาคอุตสาหกรรมและผู้บริโภคต้องการ โดยงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เทคนิคการถ่ายภาพ NIR Hyperspectral เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ตัวอย่างแบบไม่ทำลาย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพภายในของฝรั่ง ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ และ ความแน่นเนื้อ กับค่าดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรด

1.2.2 เพื่อให้ได้สมการในการทำนายคุณภาพของฝรั่ง ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ และ ความแน่นเนื้อ โดยใช้ภาพไฮเปอร์สเปกตรัมแสงย่านใกล้อินฟราเรด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาค้นคว้าพร้อมทั้งตรวจสอบคุณภาพภายในของผลฝรั่งด้วยวิธีการแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิค NIR hyperspectral imaging โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติต่าง ๆ คือ ความแน่นเนื้อ (firmness), ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS), ปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ (TA)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อให้ได้เทคนิคในการทำนายคุณภาพแบบไม่ทำลายของฝรั่งโดยใช้เทคนิค NIR hyperspectral imaging

1.4.2 สามารถสร้างสมการในการทำนายคุณภาพของฝรั่งได้ คือ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ และ ความแน่นเนื้อ (ความสุก) โดยใช้เทคนิค NIR hyperspectral imaging

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฝรั่ง

ฝรั่งมี ชื่อสามัญ Guava ชื่อพฤกษศาสตร์ Psidium Guajava วงศ์ Myrtaceae มีถิ่นอยู่ในอเมริกากลางและหมู่เกาะอินดีส์ตะวันตก ความสนใจของฝรั่งเกิดขึ้นอย่างจริงจัง เมื่อมีการนำฝรั่งเวียดนามเข้ามาปลูกไว้เมื่อปี 2517 และถือเป็นการพัฒนาสู่การปลูกเป็นการค้าอย่างจริงจังของไม้ผลชนิดนี้มาจนถึงปัจจุบัน ฝรั่งเป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ชมพู่ เหมาะกับการที่จะนำมารับประทานสด เพราะฝรั่งนั้นมีรสชาติหวานกรอบ (อภิชาติ, 2542)

คุณค่าทางอาหารของฝรั่งในหนึ่งผลต่อ 100 กรัม

ตารางที่ 2.1 ปริมาณคุณค่าทางโภชนาการของฝรั่ง

พลังงานและสารอาหาร	ปริมาณ
พลังงาน	68 กิโลแคลอรี
น้ำ	80.8 กรัม
โปรตีน	2.55 กรัม
ไขมัน	0.95 กรัม
ความชื้น	1.39 กรัม
คาร์โบไฮเดรต	14.32 กรัม
ใยอาหาร	5.4 กรัม
น้ำตาล	8.92 กรัม
วิตามินซี	228.3 มิลลิกรัม

ที่มา: U.S. Department of Agriculture (2019)



ภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะของฝรั่ง

ที่มา: <https://www.honestdocs.co.th>

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ฝรั่งเป็นไม้ยืนต้นขนาดเล็ก ขนาดลำต้นสูงประมาณ 3-10 เมตร ลักษณะเปลือกมีสีน้ำตาลอมแดงหรือสีน้ำตาลเขียว กิ่งอ่อนไม่มีขน ปกคลุม ซึ่งฝรั่งเป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว ต้นมีลักษณะเป็นพุ่ม ไม่ทึบมาก มีกิ่งก้านสาขาแตกออกจากลำต้นมากมาย ตั้งแต่บริเวณใกล้กับโคนต้น

2.1.1.1 ใบ เป็นพืชใบคู่ ใบอ่อนสีเขียวมีลักษณะไม่เรียบ มีขนอ่อนปกคลุม จะแตกแยกเป็น 2 แนวเรียงตรงข้ามกัน ด้านบนจะมีร่องลึก ใบเป็นรูปไข่ปลายมน ใบมีความกว้างประมาณ 3-7 เซนติเมตร ยาวประมาณ 5-15 เซนติเมตร ด้านหลังใบมีลักษณะเรียบ ท้องใบมีขนอ่อน ใบบานโค้ง ขอบใบเรียว

2.1.1.2 ดอก เป็นดอกเดี่ยวหรือดอกช่อ โดยมี 2-3 ดอก ต่อ 1 ช่อ ส่วนมากเกิดที่ตาข้างแล้วจะไม่เกิดที่ยอดอีก ก้านดอกจะเป็นสีเขียวอมเหลืองและมีขนอ่อนสีเขียวอมเหลืองปกคลุมอยู่ บริเวณกลีบ ร่องดอกประมาณ 4-6 อัน ขณะที่ดอกยังตูมอยู่ กลีบเลี้ยงจะหุ้มส่วนอื่น ๆ ของดอกไว้ แต่เมื่อถึงเวลาแตกตัวออก ดอกจะเริ่มคลี่บาน ส่วนชั้นของกลีบเลี้ยงผลแก่จะไม่หลุดร่วง ชั้นกลีบดอกจะเป็นสีขาวรูปร่างรี 4-5 อัน

2.1.1.3 ผล มีลักษณะกลม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-9 เซนติเมตร ความยาว 5-12 เซนติเมตร ส่วนชั้นกลีบเลี้ยงดอกจะอยู่บริเวณปลายเปลือก ผิวมีลักษณะขรุขระเล็กน้อยและเป็นมัน ผลอ่อนจะมีผิวเป็นสีเขียวเข้ม และผลสุกจะมีผิวเป็นสีเหลือง ผลชั้นกลางสีขาว ความหนาของเนื้อจะมีความแตกต่างตามลักษณะชนิดพันธุ์ โดยผลสุกมีรสชาติหวาน กลิ่นหอมแรง

2.1.1.4 เมล็ด รูปร่างมีลักษณะโค้งคล้ายไตติดอยู่กับเนื้อชั้นใจกลางของผล ซึ่งเมล็ดจะมีจำนวนมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับพันธุ์ เมล็ดมีสีเหลืองอ่อนหรือน้ำตาลอมเหลือง เปลือกค่อนข้างแข็ง มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.2 – 0.3 เซนติเมตรและความยาว 0.3 – 0.5 เซนติเมตร (นฤมล 2539)

2.1.2 ความน่าสนใจของฝรั่ง

2.1.2.1 ฝรั่งเป็นไม้ผลที่ปลูกและดูแลรักษาง่าย เป็นผลไม้ที่มีความทน สามารถปลูกได้ทุกสภาพพื้นดิน

2.1.2.2 ฝรั่งเป็นไม้ผลที่ให้ผลผลิตได้เร็ว สามารถออกดอกออกผลได้ภายในระยะเวลา 6-8 เดือนหลังปลูกด้วยวิธีการโน้มกิ่ง จึงสามารถสร้างรายได้และคืนทุนได้รวดเร็วให้แก่เกษตรกร

2.1.2.3 ฝรั่งมีหลากหลายพันธุ์ให้เลือกปลูก ซึ่งแต่ละพันธุ์ก็มีลักษณะที่โดดเด่นที่แตกต่างกันออกไป เช่น รสชาติ และลักษณะเนื้อสัมผัส เป็นต้น อีกทั้งฝรั่งก็มีพันธุ์ใหม่ๆ เกิดขึ้นมาตลอดทำให้เกิดทางเลือกใหม่ๆ ที่ให้เกษตรกรเลือกปลูกและหลากหลายให้แก่ผู้บริโภคได้รับประทาน

2.1.2.4 ฝรั่งสามารถออกดอกออกผลได้ตลอดทั้งปี จึงทำให้เกษตรกรมีรายได้ตลอดทั้งปี ฝรั่งยังสามารถบังคับให้มีการออกดอกออกผลในช่วงเวลาที่ต้องการได้โดยวิธีที่ไม่มีความยุ่งยาก ทำให้สามารถผลิตฝรั่งให้เก็บเกี่ยวในช่วงที่ฝรั่งมีราคาที่สูงได้

2.1.2.5 ฝรั่งเป็นผลไม้ที่มีความทนต่อโรค และแมลงศัตรูพืชรบกวนน้อย จึงทำให้สามารถช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายสารเคมีได้

2.1.2.6 ฝรั่งเป็นไม้ผลที่มีตลาดรองรับค่อนข้างกว้าง ลงทุนไม่สูง ให้ผลตอบแทนเร็ว และผู้บริโภคนิยมเพราะ รสชาติดี ราคาไม่แพง (อภิชาติ, 2542)

2.1.3 สายพันธุ์ฝรั่ง

พันธุ์ที่ได้รับความนิยมปลูกในปัจจุบัน ได้แก่

2.1.3.1 พันธุ์แป้นสีทอง มีลักษณะผลค่อนข้างกลม ผลดิบมีสีเขียวสดออกอ่อนเล็กน้อย ผลห่าม หรือระยะเก็บผลจะมีลักษณะสีเขียวอ่อนออกเหลืองทอง มีรสหวาน กรอบ เมล็ดน้อย



ภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะของฝรั่งพันธุ์แป้นสีทอง

ที่มา: <https://www.tops.co.th/th/my-choice-pansithong-guava-0219873000004>

2.1.3.2 ฝรั่งไร้เมล็ด หรือฝรั่งสาส์ทอง เป็นฝรั่งที่มีผิวสวยสีเหลืองทอง ผลใหญ่ รสชาติหวานกรอบ อมเปรี้ยวเล็กน้อย และให้ผลดก แต่สิ่งที่เป็นจุดเด่น คือ ไม่มีเมล็ด ดังนั้น จึงรับประทานได้ทั้งผล



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของฝรั่งพันธุ์ไร้เมล็ดหรือฝรั่งสาส์ทอง

ที่มา: <https://www.healthtodaythailand.in.th>

2.1.3.3 ฝรั่งกลมสาลี มีลักษณะผลกลมแป้น ผิวเขียวอมเหลือง ขนาดผลปานกลาง รสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย เนื้อ หนาละเอียดแน่นกรอบ สีขาว ผลที่แก่สามารถปล่อยผลไว้บนต้นได้นาน



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของฝรั่งพันธุ์กลมสาลี

ที่มา: <https://talaadthai.com>

2.1.3.4 ฝรั่งพันธุ์เงินจู หรือ กิมจู เป็นฝรั่งที่มีลักษณะผลขนาดพอเหมาะ เมล็ดน้อย รสชาติหวานกรอบ ปัจจุบันเป็นที่ต้องการของตลาด ผลผลิตมีราคาดีไม่แตกต่างจากฝรั่งไร่เมล็ด แต่มีข้อได้เปรียบคือ ติดผลง่าย ออกผลดก ปลูกได้ทุกพื้นที่ (รุ่งเกียรติ, 2559)



ภาพที่ 2.5 ลักษณะของฝรั่งพันธุ์เงินจูหรือกิมจู

ที่มา: <http://www.raithanafarm.com/aboutus>

2.1.4 โรคและศัตรูฝรั่ง

ฝรั่งเป็นผลไม้ที่ไม่จำเป็นต้องดูแลเอาใจใส่มาก เพราะฝรั่งมีความทนต่อโรค และแมลงศัตรูพืชรบกวนน้อย จึงไม่ค่อยมีโรคและแมลงระบาดร้ายแรงที่จะสามารถป้องกันรักษาได้ โดยโรคที่พบในฝรั่งนั้นมีน้อยมากและไม่ค่อยร้ายแรงเท่าไร

2.1.4.1 โรคใบจุดและใบไหม้

ลักษณะของโรค ใบจะเป็นจุดหรือใบไหม้เป็นสีเทา อาการเริ่มแรกเริ่มเกิดจากแผลที่เกิดจากแมลง เช่นเพลี้ยไฟ แมงมุมแดง หรือแมงปากเจาะจุด หรือกัดกินใบก่อน ต่อมาสปอร์ของราปลิวมาตามลมจึงเข้ามาแพร่เชื้อ ทำให้ใบมีจุดแผลเป็นจุด ๆ สีน้ำตาลค่อนข้างใหญ่ มีขอบสีน้ำตาลเข้ม เนื้อแผลข้างในจะมีสีออกเทา ต่อมาเมื่ออวัยวะสืบพันธุ์ของราขึ้นมาบนแผล มีลักษณะเป็นจุดสีดำประอยู่ทั่วทั้งแผล นอกจากอาการใบจุด แล้วเชื้อยังทำให้เกิดอาการใบไหม้ ซึ่งโดยมากจะไหม้จากขอบใบขึ้นมาแผลจะเป็นสีเทา เมื่อแผลเก่าจะมีจุดสีดำของอวัยวะสืบพันธุ์ ขึ้นอยู่ทั้งแผล เช่นเดียวกัน เชื้อนี้ก็สามารถทำลายผลอ่อนเช่นเดียวกัน ทำให้ผลอ่อนมีอาการเป็นจุดสีน้ำตาลกลมตรงกลางแผลจะบวม ขนาดเล็กประมาณ 2 มิลลิเมตร เมื่อเยื่อส่วนนั้นจะแข็งเป็นกระจัดกระจายได้ทั้งผล บางครั้งหลายแผลรวมเป็นแผลใหญ่ อาการทั้งหมดนี้เกิดจากเชื้อราชื่อ เพสตาโลติออปซิสหรือเดิมเรียกว่าเพสตาโลเตีย เชื้อรานี้จะไม่เกิดกับใบหรือผลอ่อนโดยตรง แต่จะเกิดโดยถูกแมลงกัดกินให้เกิดแผลก่อน จากนั้นเมื่อได้รับเชื้อราที่ถูกระแสลมพัดมาก็จะทำให้เกิดโรคนี้ได้ แต่สำหรับสวนฝรั่งที่มีการดูแลพ่นสารกำจัดราอยู่เสมอ ก็จะไม่พบของโรคนี้ โรคใบจุดและใบไหม้ก็ยังไม่ใช่โรคที่สำคัญสำหรับโรคฝรั่งเท่าไร แต่ถ้าจะป้องกันก็ทำได้โดยคอยดูแลหมั่นกำจัดแมลงไม่ให้มากัดกินใบและผลฝรั่ง และมีการฉีดพ่นยากำจัดราอย่างสม่ำเสมอ แต่ถ้าเป็นมากก็ต้องใช้สารกำจัดราทั่วไป

2.1.4.2 โรคแอนแทรคโนส ผลเน่าและใบเน่า ถ้าอากาศชื้นเชื้อจะสร้างกลุ่มสปอร์เป็นเมื่อสีส้มมองเห็นด้วยตาเปล่า ถ้าอากาศแห้งเมื่อก็ก็น่าจะเป็นผงสามารถกระจายไปกับลม อาการเริ่มแรก ถ้าผลถูกแมลงทำลายในช่วงที่ผลยังแข็ง จะพักตัวประมาณ 2-3 เดือน จากนั้นเมื่อผลแก่ก็เริ่มแสดงอาการ ผลเน่า (สร้สวัสดิ์, 2541)

2.2 หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้

อินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared) เป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 780 – 2500 นาโนเมตร โดยอาศัยหลักการคือ เมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ แล้วสารเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง near infrared ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่ความถี่สูงในการสั่นของพันธะต่างๆ จะเกิดขึ้นที่ช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพันธะ รวมทั้งค่าแหล่งของโมเลกุลและช่วงการดูดกลืนแสงก็เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลก็จะเกิดการสั่นและการดูดกลืนรังสีเอาไว้ ทำให้พลังงานมากกว่าปกติจากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสภาวะ

ปกติ (ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สภาวะปกติก็จะปล่อยพลังงานที่รับเข้าไปออกมาในรูปของพลังงานความร้อน ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสง (absorbance, A) เป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) พลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกกลืนแสงไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบ เช่น O-H พบในแป้ง น้ำ น้ำตาล N-H พบในโปรตีนและ C-H พบในน้ำมัน โดยการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดของโมเลกุลสารอินทรีย์ช่วงคลื่นอินฟราเรดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 แสดงช่วงคลื่นแม่เหล็กย่านอินฟราเรด

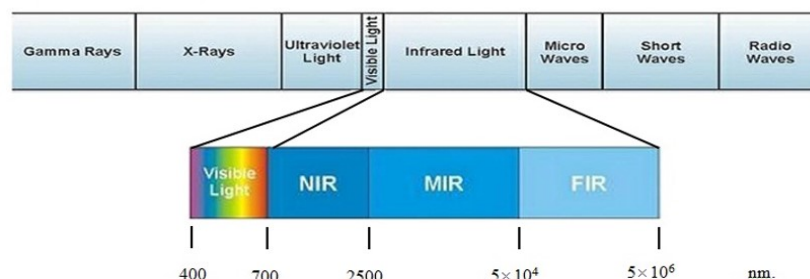
ช่วงคลื่น	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	จำนวนคลื่น (cm^{-1})
อินฟราเรดย่านใกล้ (near IR, NIR)	780-2,500	12,800-4,000
อินฟราเรดย่านกลาง (mid IR or fundamental IR)	2,500-50,000	4,000-200
อินฟราเรดย่านไกล (far IR)	50,000-1,000,000	200-10

ที่มา: นิพนธ์ (2545)

ช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared หรือ overtone region) มีความยาวคลื่นในช่วง 780-2,500 นาโนเมตร แถบการดูดกลืนคลื่นแสงเกิดจาก overtone และมักพบว่าช่วงการดูดกลืนแสงที่ได้ค่อนข้างต่ำมีประโยชน์ในการวิเคราะห์หาปริมาณของกลุ่ม functional และศึกษาโครงสร้างโมเลกุล (ภาพที่ 2.1)

ช่วงกลางอินฟราเรด (middle infrared หรือ fundamental region) มีความยาวคลื่นในช่วง 2,500-50,000 นาโนเมตร สเปกตรัมที่อ่านได้ค่อนข้างยุ่งยากเพราะโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ การวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่ทราบโครงสร้างแล้ว ใช้ในการวิเคราะห์พวกกลุ่ม functional

ช่วงไกลอินฟราเรด (far infrared) มีความยาวคลื่นในช่วง 50,000-1,000,000 นาโนเมตร ช่วงนี้ไม่ค่อยที่จะได้ใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากสเปกตรัมไม่ได้เกิดจากการสั่นหรือการหมุนของโมเลกุล แต่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการ transition ที่เกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุล



ภาพที่ 2.6 ช่วงความยาวคลื่นของ near infrared spectra ที่อยู่ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ที่มา: วชิรภรณ์, (2550)

2.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจาก near infrared spectra

การวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIR ประกอบไปด้วยขั้นตอน 2 ขั้นตอนหลัก คือ

2.2.1.1 ขั้นตอนการสร้างสมการที่ใช้ในการทำนาย (calibration)

2.2.1.2 ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของที่ถูกสร้างขึ้นมา (validation)

ในการทำ calibration ก็เพื่อให้ได้สมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายค่าคุณลักษณะคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทราบ ต่อจากนั้นต้องมีการนำสมการมาตรฐานที่ได้จากการทำ calibration มาตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของสมการมาตรฐานในการทำนายคุณภาพ ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่าการทำ validation หรือ verification เพื่อทดสอบสมการที่ได้ว่ามีความเหมาะสมหรือแม่นยำเพียงใด เมื่อได้ผลทดสอบที่น่าเชื่อถือแล้วจึงจำนำสมการที่ได้ไปใช้ทำนายค่าคุณลักษณะที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัม NIR ที่ทำการวัดมาได้

2.2.1.1.1 ขั้นตอนการทำ calibration

2.2.1.1.1.1. กำหนดตัวแปรอิสระ (independent variables) และตัวแปรตาม (dependent variables) โดยที่ ตัวแปรอิสระ (independent variables) ที่นำมาใช้ในการสร้างสมการคือค่าที่อ่านได้จากสเปกตรัม NIR เช่น ค่า $\log(1/R)$ เป็นต้น ส่วนตัวแปรตาม (dependent variables) หมายถึงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี reference laboratory methods เช่น ความหวานของผลไม้ ด้วยการหาค่า brix จาก brix refract meter

2.2.1.1.1.2. การสร้างสมการ calibration ในการสร้างสมการนั้นสิ่งที่สำคัญคือการหาตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์คุณภาพ การคัดเลือกหาตัวแปรอิสระสามารถทำได้ 2 วิธีหลัก คือ

ก) wavelength selection เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์เทคนิคในการเลือกมีหลายแบบ เช่น เลือก

ความรู้ความชำนาญหรือเอกสารอ้างอิงที่บ่งบอกถึงช่วงความยาวคลื่นที่คาดว่าจะสัมพันธ์กับค่าที่จะทำการวิเคราะห์ อาจจะใช้เทคนิคทางสถิติในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์

ข) full spectrum analysis เป็นวิธีการคัดเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสม (selective wavelength) จากความยาวคลื่นที่มีในสเปกตรัมทั้งหมดมาสร้างสมการ calibration วิธีที่กล่าวมาข้างต้น บางครั้งอาจเกิดข้อผิดพลาดได้จากการสร้างสมการที่ไม่ถูกต้อง และทำให้เกิดปัญหาค่าที่ทำนายต่ำกว่าหรือสูงกว่าที่แท้จริง (underestimation) ตามมา ซึ่งมาจากการเกิดความคลาดเคลื่อนจากการสร้างสมการ (interference) หรือเกิดปัญหาเมื่อมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการมีน้อย จึงทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการ ทำข้อมูลไม่น่าเชื่อถือ (over fitting) การใช้ข้อมูลทั้งหมดที่มีในทุกความยาวคลื่นของสเปกตรัม (Full spectrum) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ แต่ก็ยังพบปัญหาคือการทำตัวแปรอิสระมากเกินไป จึงต้องใช้วิธีทางสถิติในการจัดกลุ่มแยกประเภทตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกันเข้ามารวมด้วย เพื่อทำการสร้างตัวแปรใหม่ที่เกิดมาจากตัวแปรเดิม ซึ่งจะช่วยให้แก้ปัญหาได้ โดยวิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่ partial least square (PLS) regression เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบตัวแปรหลายตัวแปรโดยการสร้าง factor แบบสมการเชิงเส้นตรงจากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้นและนำ factor ที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย โดย factor ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยวิธีสถิติ PLS ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกันวัตถุประสงค์ของ PLS เพื่อต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัมให้ได้เฉพาะข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสำคัญกับการทำนายค่าทางเคมีที่สนใจเท่านั้น เพื่อให้สามารถประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น (ธงชัย, 2545)

2.2.1.2.1 การทำ validation หลังจากที่ได้สร้างสมการแล้ว ต้องทดสอบประสิทธิภาพของสมการก่อนที่จะมีการนำไปใช้งานจริง โดยวิธีการทดสอบสมการที่เป็นที่นิยมกันมีอยู่ 2 วิธี คือ

2.2.1.2.1.1 full cross validation เป็นการทดสอบสมการภายในความหมายคือ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบสมการ เป็นตัวอย่างชุดมาตรฐานทั้งหมด ที่ใช้สร้างสมการประเมินค่าทางเคมี

2.2.1.2.1.2 การทดสอบการประเมิน (prediction testing) วิธีนี้จะทดสอบสมการแบบภายนอก โดยการเตรียมตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลอง เช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดลองสมการนี้ว่า ชุดทดสอบ (testing set) ตัวแปรอิสระ (X) มากกว่าหนึ่งตัวในการประมาณค่าตัวแปรตาม (Y) สิ่งที่ต้องระวังคือ ปริมาณค่าทางเคมีที่ใช้ทดสอบต้องอยู่ในช่วงมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมจากชุดทดสอบตัวอย่างก็ให้นำค่าที่ได้

ไปคำนวณหาปริมาณค่าทางเคมีจากสมการ จากนั้นดูผลการคำนวณที่ได้จากค่าทางสถิติ โดยพิจารณาเปรียบเทียบมีค่าทางสถิติที่ใช้วัดคือ SEP (standard error of prediction) หรือ RMSEP (root mean square error of prediction) และ bias ซึ่งค่าสถิติเหล่านี้ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสมการ calibration ถ้าค่าเหล่านี้มีค่าน้อยๆ แสดงว่าค่าที่ ประเมินได้จากสมการ calibration ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จาก reference method สามารถนำไปใช้ประเมินค่าได้ (นิพนธ์, 2545)

2.3 NIR hyperspectral imaging

เป็นเทคนิคใหม่ของ NIRS โดยการใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพมาใช้ร่วมกับเทคนิคการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดของตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์สเปกตรัมจำนวนมากกับตัวแปรอิสระจำนวนมากแทนการใช้สเปกตรัมเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง ซึ่งผลลัพธ์จะแสดงว่าแต่ละพิกเซลของรูปภาพของตัวอย่างจะเป็นการเชื่อมโยงข้อมูลภาพของแต่ละตัวอย่างค่าฟิสิกส์และเคมี มาพิจารณา กับสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรด (Teerachaichayut and Ho, 2017)

เทคนิค HSI มีลักษณะคล้ายวิธี NIRS แต่เทคนิค HSI จะใช้เส้นสเปกตรัมจากภาพถ่ายเชิงสเปกตรัมจากซอฟต์แวร์ โดยจะใช้ข้อมูลข้อมูลสเปกตรัมในตำแหน่งของภาพถ่ายที่สนใจหรือมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบที่ต้องการศึกษา (region of interest, ROI) ทำให้ได้ สเปกตรัมเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่นของการถ่ายภาพ (He and Sun 2015, Wu and Sun, 2013)

2.4 ทฤษฎีการตรวจสอบคุณภาพทางเคมีและทางกายภาพ

2.4.1 titratable acidity คือการวัดปริมาณกรดทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร โดยการไทเทรตด้วยสารละลายต่างมาตรฐาน (NaOH) เช่น น้ำผลไม้ น้ำนม โวเนส ซึ่งกรดในอาหารมีความสัมพันธ์กับรสเปรี้ยว (sour) ของอาหาร กรดในอาหารอาจประกอบด้วยกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดซิตริก (citric acid) กรดมาลิก (malic acid) กรดแล็กติก (lactic acid) กรดทาร์ทาริก (tartaric acid) (พิมพ์เพ็ญ, 2555)

2.4.2 total soluble solid หรือ ของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ หมายถึง ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดใช้บ่งชี้ความเข้มข้นของอาหารเหลว เช่น น้ำเชื่อม น้ำผลไม้เข้มข้น ของแข็งที่ละลายได้ในน้ำคั้นจาก ผัก ผลไม้ เป็นผลรวมของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่างๆ เช่น น้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรักโทส กรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก กรดแล็กติก และแร่ธาตุต่าง ๆ สามารถใช้ เป็นดัชนีวัดความแก่อ่อน (maturity index) ของผักผลไม้ การวัดค่า total soluble solid ในน้ำผลไม้ หรือน้ำผลไม้เข้มข้น อนุโลมให้ใช้การวัดค่าด้วย refractometer มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรหากเป็นสารละลายน้ำตาลหรือน้ำเชื่อม มีหน่วยเป็น องศาบริกซ์ ($^{\circ}$ Brix) หรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อน้ำหนัก (พิมพ์เพ็ญ, 2555)

2.4.3 texture analysis เป็นสมบัติเชิงกลซึ่งเกิดจากการตอบสนองของผลิตผลทางการเกษตรและอาหารต่อแรงที่กระทำตัวอย่างแรงที่กระทำ ได้แก่ แรงกดจากการซ้อนทับกันของผักและผลไม้ แรงที่เกิดจากการกระทำของเครื่องจักรต่อส่วนผสมของอาหาร เป็นต้น ตัวอย่างสมบัติความแน่นเนื้อของผลิตผลทางการเกษตร ได้แก่ ความแน่นเนื้อ (firmness) ความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (elasticity) เป็นต้น (ปานมนัส, 2559)

การทดสอบด้วยวิธี texture profile analysis ประยุกต์ใช้วัดความแน่นเนื้อของอาหารหลายชนิดอาหารที่อยู่ในสภาวะที่พร้อมรับประทาน ได้แก่ เนื้อสัตว์ (meat) และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ เช่น แฮม ไส้กรอก เนยแข็งผัก ผลไม้ เต้าหู้ เยลลี่ เพราะคุณภาพที่ได้สัมพันธ์กับการทดสอบทางประสาทสัมผัส (sensory evaluation) (พิมพ์เพ็ญ, 2549)

ความแน่นเนื้อจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความนุ่มนวล หรือความกรอบของผลไม้ และยังสามารถใช้ในการประเมินความสุข, ความสดโดยอ้อม ซึ่งจะช่วยประเมินการตัดสินใจต่อการเก็บเกี่ยวและ การเลือกใช้วัตถุดิบนั้นๆ ซึ่งค่าที่ปรากฏจะบ่งบอกถึงแรงที่ใช้ในการเจาะวัตถุดิบให้เกิดรู แรงที่ใช้ สามารถบ่งบอกความสุขของผลไม้แต่ละประเภทได้ (สคุดี, 2558)

2.5 ค่าทางสถิติ

2.5.1 standard error of prediction (SEP) แสดงสมรรถนะของการทำนาย SEP เป็นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง ซึ่งไม่เหมือนกับ RMSEP (root mean square of the prediction) ซึ่งจะอธิบายต่อไปโดย SEP ไม่เกี่ยวข้องกับ bias ค่า SEP คำนวณจากผลการทำนายของชุดตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง ชุดตัวอย่างนี้เรียกว่า ชุดทำนาย (prediction set) (Williams, 2007)

2.5.2 standard error of calibration (SEC) คือ ค่า SD ของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงในชุดตัวอย่างที่ใช้สร้างแบบจำลอง (calibration set) ถ้าใช้ MLR จะพบว่า R และ SEC จะดีขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรต้นมากขึ้น สิ่งนี้เรียกว่า over-fitting ของข้อมูล ตามหลักค่า SEP ควรจะสูงกว่า SEC เสมอ (Williams, 2007)

2.5.3 root mean square of the prediction หรือ (RMSEP) เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพของแบบจำลอง การคำนวณค่า RMSEP ได้รวมค่า Bias ไว้ด้วย ถ้าไม่มีค่า bias ค่า SEP และ RMSEP จะมีค่าเท่ากัน มีการใช้ RMSEP มากกว่า SEP แต่การรายงานผลโดยใช้ SEP กับ Bias แสดงถึงความแม่นยำของการทำนายได้ดี เนื่องจาก RMSEP เกี่ยวข้องกับ Bias แต่ไม่ได้แสดงขนาดและเครื่องหมาย (Williams, 2007)

2.5.4 root mean square error of cross validation (RMSEC) ใช้สำหรับการประเมินความถูกต้องเฉลี่ยในการทำนายของแบบจำลองเคโมเมทริกซ์ ซึ่งถ้าค่าความผิดพลาด (error) น้อย แสดงว่าแบบจำลองนั้นมีคุณภาพดี (ปานมนัส, 2555)

2.5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) เป็นค่าที่นำมาใช้วัดว่าตัวแบบสมการเชิงเส้นที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ สามารถใช้ศึกษาว่าสมการการประมาณค่ามีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ได้มากหรือน้อยค่าที่คำนวณได้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 สัญลักษณ์ที่ใช้คือ R^2 ในกรณีที่ค่า R^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปร X มีอิทธิพลต่อตัวแปร Y อย่างมาก โดยการตีความหมายของค่า R^2 ดังตาราง 2.3

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การพิจารณาความหมายของค่า R^2 ดังตาราง

ค่าของ R^2	การตีความหมาย
0.25 ขึ้นไปถึง 5	ไม่สามารถใช้งานได้ในการสอบเทียบ
0.26 – 0.49	ความสัมพันธ์ที่ไม่ดี, วิจัยเหตุผล
0.50 – 0.64	การตรวจคัดกรองแบบหยาบ
0.66 – 0.81	การคัดกรองและการประมาณค่าหยาบๆ
0.83 – 0.90	ใช้งานด้วยความระมัดระวังสำหรับทุกโปรแกรมรวมถึงการวิจัย
0.92 – 0.96	ใช้งานมากที่สุดรวมถึงการประกันคุณภาพ
0.98 >	ใช้งานได้อย่างดีเยี่ยมในการประยุกต์ใช้งาน

ที่มา: สินีนาถ (2556)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณภาพของผลไม้โดยวิธีไม่ทำลาย

ณัฐกานต์ และคณะ (2546) ได้ศึกษาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในฝรั่งพันธุ์กลมสาเล่ ซึ่งถือเป็นปัจจัยคุณภาพที่มีความสัมพันธ์กับความหวานของฝรั่งโดยได้ประยุกต์เทคนิค NIR มาใช้ในการประเมินปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของฝรั่งพันธุ์กลมสาเล่ทำการทดสอบที่ช่วงความยาวคลื่น 1,100-2,500 นาโนเมตร

รณฤทธิ์ และคณะ (2551) ใช้ระบบการทำนายคุณภาพแบบไม่ทำลายกับผลฝรั่ง คือ ทำนายปริมาณความหวาน และปริมาณวิตามินซีโดยสร้างความสัมพันธ์คุณภาพกับการดูดกลืนพลังงานย่าน NIR ด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี MLR โดยผลฝรั่งถูกวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา

วิศรุต และคณะ (2553) ใช้เทคนิค near infrared spectroscopy (NIR) ในการประเมินค่าความหวานของแตงโมพร้อมบริโภคน้ำที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝน 120 ตัวอย่าง โดยใช้ปืนเนียร์อินฟราเรด โดยใช้ช่วงความยาวคลื่น 702-1092 นาโนเมตร และใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ partial least square regression (PLS)

สินีนาด และคณะ (2556) ใช้เทคนิคแสง ย่านใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่าน ช่วงความยาวคลื่น 665-955 นาโนเมตร ในการคัดแยกคุณภาพ ของมะขามหวาน

สดุติ และคณะ (2558) ตรวจสอบผลมะยงชิดพันธุ์ทุลเกล้า โดยการใช้คลื่นรังสี เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในโหมด transmittance ที่มีช่วงความยาวคลื่น 655 - 955 นาโนเมตร ผลทำการทดสอบสมการจากการวิเคราะห์การถดถอยบางส่วนโดย วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (partial least squares regression หรือ PLSR)

Teerachaichayut and Huong (2017) ตรวจสอบโดยใช้มะนาว 2 พันธุ์ คือ มะนาวพันธุ์แป้นและมะนาวพันธุ์ไข่ และ เครื่องเนียร์อินฟราเรดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีทั้งหมด 4 ชนิด คือ NIR spectrometer แบบพกพา โหมด interactance ที่ความยาวคลื่น 588-1089 นาโนเมตร, FT-NIR spectrometer โหมด reflectance ที่ความยาวคลื่น 1000-2500 นาโนเมตร, Vis -NIRs โหมด reflectance ที่ความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตร และ NIR hyperspectral imaging โหมด reflectance ความยาวคลื่น 910-1700 นาโนเมตร จะตรวจคุณภาพมะนาวทั้งในด้านเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ การตรวจสอบในด้านเชิงปริมาณในงานวิจัย คือ ตรวจสอบปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ, ตรวจสอบปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ หรือค่า pH, ตรวจสอบ ปริมาณน้ำคั้นของผลมะนาว ส่วนการตรวจสอบในด้านเชิงคุณภาพในงานวิจัยนี้ คือ การคัดแยกพันธุ์ มะนาวระหว่างพันธุ์แป้นและพันธุ์ไข่ เพื่อแก้ปัญหาการปลอมปนของพันธุ์มะนาว

Rungpichayapichet et al. (2017) มีการศึกษา การใช้ Hyper spectral imaging (HSI) เป็นเทคนิคที่มีการพัฒนารูปแบบใหม่ของกล้องเพื่อที่จะตรวจสอบหาค่าคุณสมบัติภายในของมะม่วง คือ ความแน่นเนื้อ, ค่า TSS (total soluble solids) และค่า TA (titratable acidity) โดยทำนายแบบจำลองการใช้ข้อมูลในการส่องแสงโดยอาศัย ความสัมพันธ์การสะท้อนของพื้นผิวจากผลไม้ 160 ผลในช่วงของแสงที่สามารถมองเห็นได้และช่วงที่ ใกล้แสงอินฟราเรด (VIS/NIR) โดยอยู่ในช่วง 450-998 nm และเป็นเทคนิคแบบไม่ทำลายสำหรับการกำหนดคุณภาพของผลไม้ซึ่งอาจสามารถเพิ่มระดับความสามารถในการอุตสาหกรรมการจัดการ และการประมวลผลของมะม่วง

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 วัตถุดิบ

3.1.1.1 ฝรั่ง พันธุ์ แป้นสีทอง จากสวนรุ่งอนันต์ จังหวัด นครปฐม

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 mol/l

3.1.2.2 ฟีนอล์ฟทาลีน 1%

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 เครื่อง near infrared spectroscopy hyperspectral imaging (Specim Fx17, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland)

3.2.2 เครื่อง digital refractometer รุ่น PAL-1

3.2.3 เครื่อง texture analysis รุ่น TA-Plus texture analyzer (Lloyds Instruments, UK).

3.3.4 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.3.5 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (รุ่น BP31005, ยี่ห้อ Sartorius)

3.3 โปรแกรมที่วิเคราะห์ทางสถิติ

3.3.1 โปรแกรม Unscrambler® version 9.7 (Camo, Oslo, Norway)

3.3.2 โปรแกรม Umbio Evince

3.3.3 โปรแกรม Lumo

3.4 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.4.1 การทดลองเพื่อสร้างสมการทำนายคุณลักษณะของฝรั่ง

3.4.1.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

ใช้ตัวอย่างเป็นฝรั่ง พันธุ์ แป้นสีทอง โดยจะใช้ฝรั่งวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่อง texture analysis จำนวน 138 ลูก และวิเคราะห์ค่าทางเคมีโดยวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้และวัดปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ จำนวน 100 ลูก จากสวนรุ่งอนันต์ จังหวัด นครปฐม ทำการขนส่งโดยทางรถยนต์มายังห้องปฏิบัติการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยฝรั่งที่ซื้อมาจะต้องมีคุณลักษณะดี ผลไม่มีรอยช้ำน้ำตาล ผิวเรียบเนียน โดยจะใช้ฝรั่งขนาดประมาณ 700 กรัมต่อลูก โดยทำการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง

ปรับอากาศที่รักษาอุณหภูมิห้องที่ระดับ 25 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิในการวัด และทำการสุ่มทำนายวัดต่อวัน วันละ 10 ลูก

3.4.1.2 การวัดด้วย NIR hyperspectral imaging

นำฝรั่งแป้นสีทอง แต่ละลูก มาวัดการดูดกลืนพลังงานด้วย เครื่อง NIR hyperspectral imaging โดยใช้หลักการวัดแบบสะท้อนแสง (reflectance) ช่วงความยาว คลื่น 910 - 1700 นาโนเมตร nm โดยระบบ hyperspectral imaging camera ประกอบไปด้วย target start 40 Target stop 200 scanning speed 5 มิลลิเมตร/วินาที

3.4.1.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

3.4.1.3.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง texture analysis

ใช้ฝรั่งจำนวน 138 ลูก มาทำการวัดหาค่าความแน่นเนื้อโดยเครื่อง texture จะวัดค่าความแน่นเนื้อของฝรั่งตรงจุดเดียวกับจุดที่ทำการสแกนและจะทำการวัดจำนวน 3 มุมในลูกของฝรั่ง โดยใช้หัววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ความเร็วในการทดสอบ 1.5 mm/s ความลึกของการเจาะ 5 mm หน่วยของความแน่นเนื้อเป็น N

3.4.1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าทางเคมี

ใช้ฝรั่งจำนวน 100 ลูก มาทำการวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด และใช้ฝรั่งจำนวน 100 ลูก มาทำการวัดปริมาณกรด, โดยทำการปั่นฝรั่งโดยใช้เครื่องปั่นแยกกาก แล้วนำมากรองด้วยผ้าขาวบาง

3.4.1.4.1 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solid, TSS) (AOAC, 2000)

นำน้ำคั้นฝรั่ง ที่ได้มาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยใช้เครื่อง digital refractometer โดยหยดน้ำคั้นฝรั่งลงไป และอ่านค่าที่ได้ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.4.1.4.2 การวัดปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity, TA) (AOAC, 2000)

โดยคั้นน้ำฝรั่ง ปริมาตร 5 มิลลิลิตร มาไตเตรทด้วยสารละลายต่างมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 N บันทึกปริมาตรของสารละลายต่างมาตรฐานโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่ได้ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ยและคำนวณหาปริมาณกรดที่ไตเตรทได้จากสูตร

$$\text{TA citric acid (\%)} = \frac{\text{ปริมาตร } \mathbf{NaOH (ml)} \times \text{ความเข้มข้นของ } \mathbf{NaOH (N)} \times 0.064 \times 100}{\text{ปริมาตรน้ำฝรั่งที่คั้น (ml)}} \quad (1)$$

*** milliequivalent of citric (anhydrous) = 0.064

3.4.1.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติ

กำหนดตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ โดยให้ตัวแปรตาม คือค่าทางเคมี ได้แก่ ปริมาณกรด ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ส่วนตัวแปรอิสระ คือ ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง NIR hyperspectral imaging

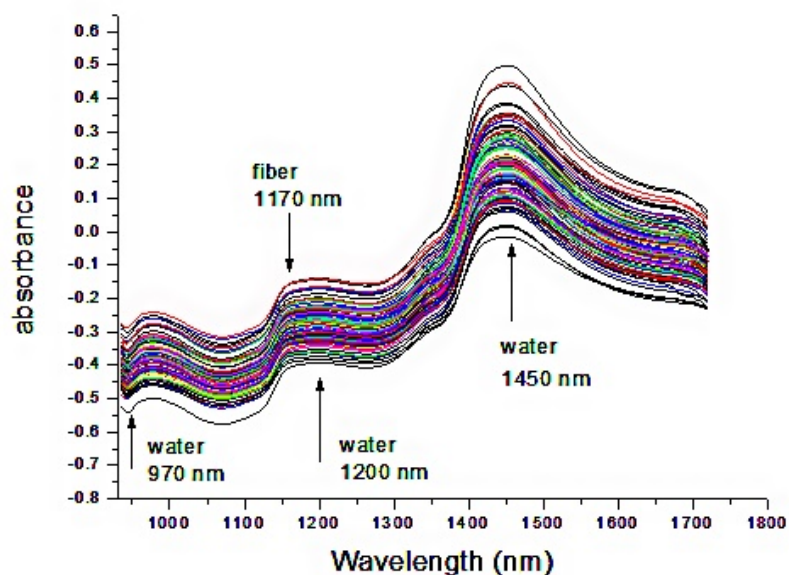
นำข้อมูลค่าตัวแปรตามมาเรียงกัน โดยเรียงค่าตัวแปรตาม ทั้งหมดของฝรั่ง เรียงจากน้อยไปมากแล้วทำการแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็น กลุ่มสำหรับการสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มสำหรับการทดสอบสมการ (prediction set) กลุ่ม calibration จะต้องมีจำนวนข้อมูลไม่เกิน 70 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่ม prediction จะต้องมีจำนวน ข้อมูลไม่ต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ โดยแต่ละกลุ่ม มีการกระจายตัวของข้อมูลเท่ากัน ค่าเคมีในกลุ่ม calibration จะต้องมีค่าเคมีที่ต่ำสุดและสูงอยู่ในกลุ่มนี้

นำข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยในกลุ่ม calibration มาสร้าง สมการในการทำนาย โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) เลือกสมการที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด จากการพิจารณาที่ ค่า R^2 (correlation coefficient) ให้มีค่าสูงสุด, RMSECV ต้องมีค่าต่ำที่สุด และ factor ต้องค่าต่ำสุดด้วย เมื่อได้สมการ calibration แล้ว ให้นำไปทำนาย ตัวอย่างในกลุ่ม prediction set เพื่อดูความแม่นยำของสมการ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

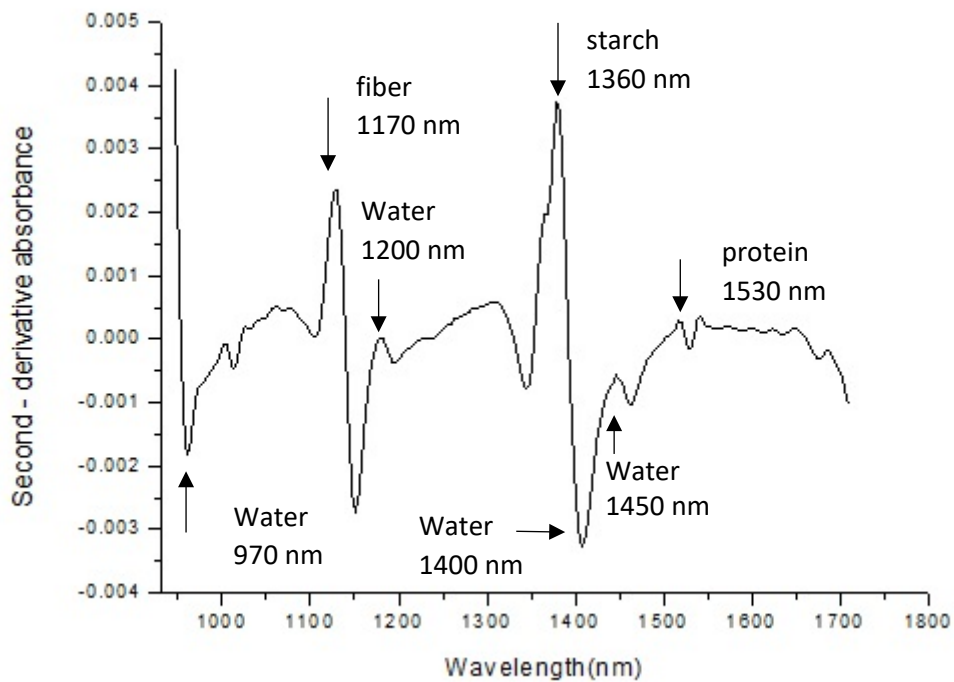
จากการทดลองโดยใช้ฝรั่งพันธุ์แป้นสีทอง โดยตัวอย่างถูกเลือกโดยจะเลือกลักษณะที่มีขนาดใกล้เคียงกันและลักษณะผิวค่อนข้างเรียบเนียน หลังจากนั้นฝรั่งแต่ละชิ้นถูกสแกนโดยใช้เครื่อง NIR hyperspectral imaging โหมด reflectance ในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตร และทำการตรวจสอบคุณภาพของฝรั่ง ได้แก่ ตรวจสอบปริมาณกรดที่ไตเตรท (titratable acidity), ตรวจสอบปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของฝรั่ง (total soluble solids) และ ตรวจสอบค่าความแน่นเนื้อ (firmness)



ภาพที่ 4.1 ค่าสเปกตรัมจากเครื่อง NIR hyperspectral imaging โหมด reflectance ในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตร

ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของตัวอย่างทั้งหมด จะแสดงจุดพีคของเส้นสเปกตรัมที่สำคัญที่ได้รับจะอยู่ที่ช่วงประมาณ 970, 1170-1200 และ 1450 นาโนเมตร (ภาพที่ 4.1) ซึ่งจุดพีคของสเปกตรัมจะแสดงว่าน้ำและเส้นใยไฟเบอร์เป็นองค์ประกอบพบในฝรั่ง เนื่องจากน้ำมีการดูดซับ จุดสูงสุดของ 970, 1200 และ 1450 นาโนเมตร และเส้นใยไฟเบอร์ที่ 1170 นาโนเมตร (Workman and Weyer, 2012)

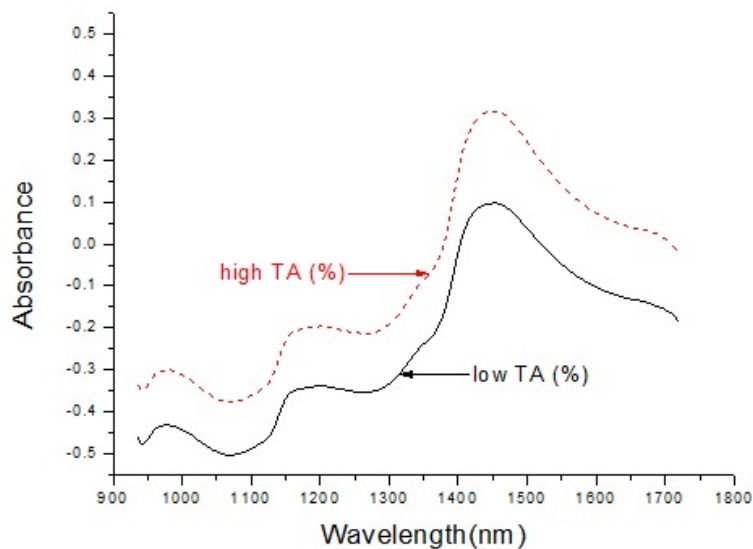
เมื่อทำการปรับสภาพด้วยอนุพันธ์อันดับสองเพื่อเพิ่มความละเอียดของสเปกตรัมและการแก้ปัญหาการทับซ้อนสูงสุด ขั้นตอนนี้ทำให้ยอดสเปกตรัมแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นสเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองของตัวอย่างทั้งหมดจึงถูกประมวลผล ภาพที่ 4.2 แสดงจุดพีคที่ชัดเจนในช่วงประมาณ 970, 1170, 1200, 1360, 1400, 1450, และ 1530 นาโนเมตร ซึ่งจุดพีคของสเปกตรัมจะแสดงว่ามีน้ำ, เส้นใยไฟเบอร์, แป้ง, โปรตีน เป็นองค์ประกอบที่พบในฝรั่ง (Workman and Weyer, 2012)



ภาพที่ 4.2 ค่าสเปกตรัมที่ทำการปรับสภาพด้วยอนุพันธ์อันดับสองของฝรั่ง

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับตัวแปรต่าง ๆ

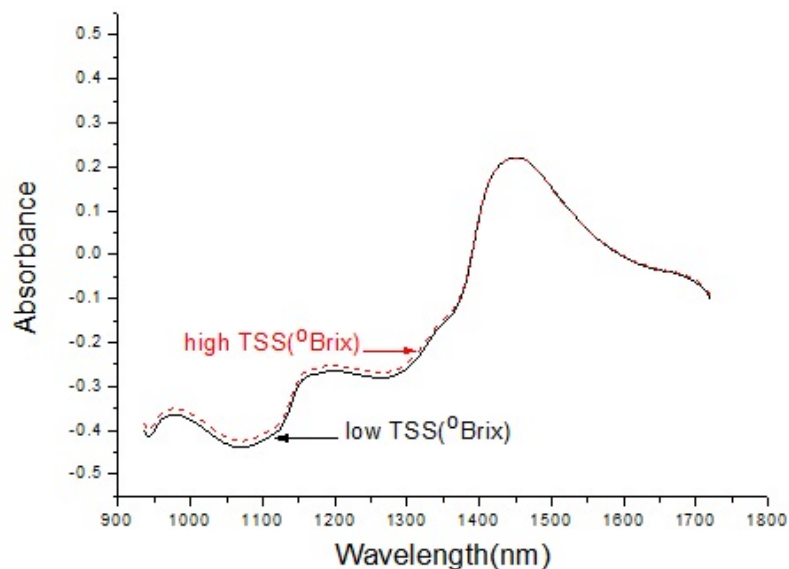
4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง โดยดูจากปริมาณกรดที่ไตเตรท (titratable acidity)



ภาพที่ 4.3 กราฟค่าการดูดกลืนแสงของกลุ่มฝรั่งโดยดูจากปริมาณกรดที่ไตเตรทที่มีปริมาณกรดต่ำกับปริมาณกรดสูง

เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างฝรั่งเป็นสีทองที่มีปริมาณกรดที่ไตเตรท ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีปริมาณกรดต่ำ กับ กลุ่มที่มีปริมาณกรดสูง ในช่วงความยาวคลื่นที่ 900-1700 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่า เส้นกราฟของฝรั่งมีการดูดกลืนแสงของปริมาณกรดที่ไตเตรทสูงโดยมีปริมาณกรดอยู่ในช่วง 0.187-0.294% และต่ำมีปริมาณกรดอยู่ในช่วง 0.308 – 0.455% ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนในฝรั่ง ซึ่งปริมาณกรดที่ไตเตรทสูงจะมีการดูดกลืนแสงของฝรั่งได้สูงกว่า

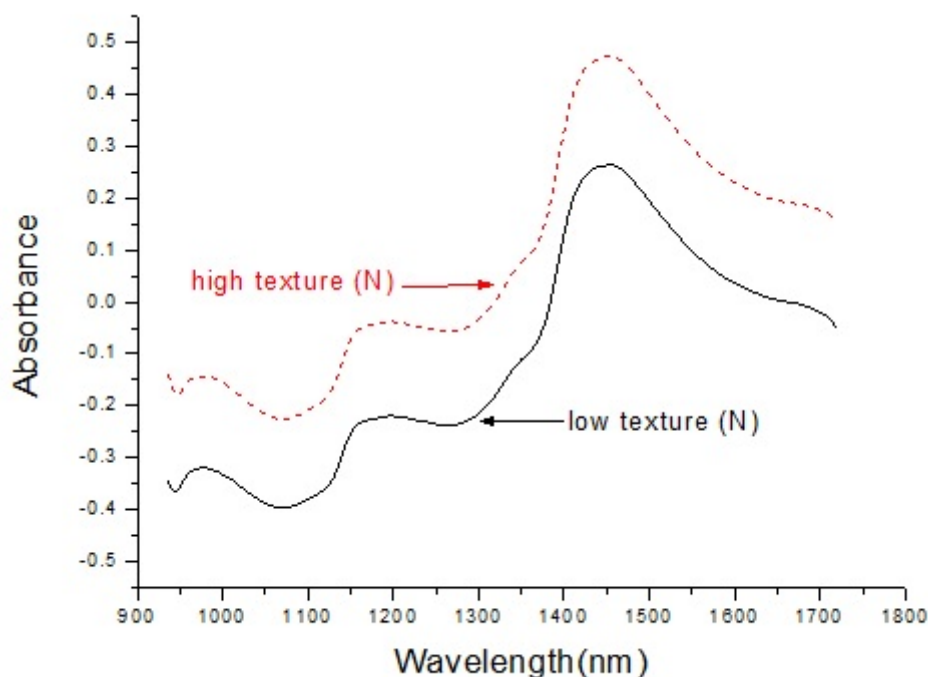
4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง โดยดูจากปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของฝรั่ง (total soluble solids)



ภาพที่ 4.4 กราฟค่าการดูดกลืนแสงของกลุ่มฝรั่งโดยดูจากปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำต่ำกับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง

เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างฝรั่งเป็นสีทองที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำต่ำกับ กลุ่มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง ในช่วงความยาวคลื่นที่ 900-1700 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่า เส้นกราฟของฝรั่งมีการดูดกลืนแสงของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูงโดยมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูงอยู่ในช่วง 8.5-11.9 °Brix และต่ำมีปริมาณกรดอยู่ในช่วง 6.9-8.4 °Brix มีค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยทั้งสองกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูงจะมีการดูดกลืนแสงได้สูงกว่าเล็กน้อย

4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง โดยดูจากความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness)



ภาพที่ 4.5 กราฟค่าการดูดกลืนแสงของกลุ่มฝรั่งโดยดูจากค่าความแน่นเนื้อของฝรั่งที่มีค่าความแน่นเนื้อต่ำกับค่าความแน่นเนื้อสูง

เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างฝรั่งเป็นสีทองที่มีค่าความแน่นเนื้อออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าความแน่นเนื้อต่ำ กับ กลุ่มที่มีค่าความแน่นเนื้อสูง ในช่วงความยาวคลื่นที่ 900-1700 นาโนเมตร จะเห็นว่า เส้นกราฟของฝรั่งมีการดูดกลืนแสงของค่าความแน่นเนื้อสูงโดยมีค่าความแน่นเนื้ออยู่ในช่วง 5.52- 8.48 N และต่ำมีค่าความแน่นเนื้ออยู่ในช่วง 3.21- 5.46 N ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนในฝรั่ง ซึ่งค่าความแน่นเนื้อสูงจะมีการดูดกลืนแสงของฝรั่งได้สูงกว่า

4.2 การสร้างสมการในการทำนายการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity)

ในการสร้างสมการในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity) จะใช้แบ่งตัวอย่างเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสำหรับสร้างสมการโมเดล (calibration set) และ กลุ่มสำหรับทดสอบสมการ (prediction set) ใช้ตัวอย่างของฝรั่งทั้งหมด 100 ตัวอย่าง ในการสร้างสมการจะต้องมีค่าปริมาณกรดที่ไตเตรทได้(titratable acidity) จะต้องมีความสูงที่สุดและต่ำสุด จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า มีจำนวนตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการ 67 ตัวอย่าง และจำนวนตัวอย่างในกลุ่มทดสอบสมการ 33 ตัวอย่าง โดยในกลุ่มสร้างสมการมีค่าปริมาณกรดที่ไตเตรท (titratable acidity) ได้อยู่ในช่วง 0.201-0.455% และในกลุ่มทดสอบสมการมีค่าปริมาณกรดที่ไตเตรทได้อยู่ในช่วง 0.1877-0.455%

ตาราง 4.1 ค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของ
การทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity)

	TA (%)	
	Calibration set	Prediction set
Number of samples	67	33
Range	0.187-0.455	0.201-.455
Mean	0.31	0.31
Standard deviation	0.064	0.063

ตาราง 4.2 ความแม่นยำสำหรับการสร้างสมการในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity) ด้วยวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตรด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ

Spectral pretreatments	N	F	R ²	RMSECV (%)
1) Original	67	7	0.959	0.013
2) Smoothing	67	8	0.958	0.014
3) MSC	67	7	0.514	0.045
4) 1 st Derivative	67	10	0.698	0.036
5) 2 nd Derivative	67	7	0.616	0.041
6) SNV	67	6	0.471	0.047
7) Smoothing + MSC	67	12	0.564	0.043
8) Smoothing + 1 st Derivative	67	8	0.717	0.035
9) Smoothing + 2 nd Derivative	67	4	0.606	0.04

10) Smoothing + SNV	67	6	0.465	0.046
11) MSC + 1 st Derivative	67	10	0.564	0.043
12) MSC + 2 nd Derivative	67	8	0.55	0.044
13) MSC + SNV	67	13	0.584	0.041
14) 1 st Derivative+2 nd Derivative	67	5	0.468	0.048
15) 1 st Derivative+SNV	67	4	0.515	0.045
16) 2 nd Derivative+SNV	67	15	0.606	0.042

F=Factors, N= number of samples, R^2 = coefficient of determination, RMSECV= root mean square error of cross validation, smoothing = Savitzky-Golay smoothing, 1st derivative = Savitzky-Golay first derivative differentiation, MSC = multiplicative scatter correction, 2nd derivative = Savitzky-Golay seond derivative differentiation, SNV = standard normal variate transformation

ทำการปรับแต่งสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตรด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสมการโมเดล โดยวิธีการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ได้แก่ Smoothing, MSC, 1st Derivative, 2nd Derivative, SNV และการผสมระหว่าง Smoothing + MSC, MSC + 1st Derivative, 1st Derivative+2ndDerivative เป็นต้น ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4.2 จากตาราง 4.2 พบว่าการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดั้งเดิมให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ $R^2 = 0.959$ และ RMSECV = 0.013% โดยจะพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าสูงสุด, ค่า RMSECV ที่มีค่าต่ำสุดและค่า F ต้องมีค่าที่ต่ำสุด

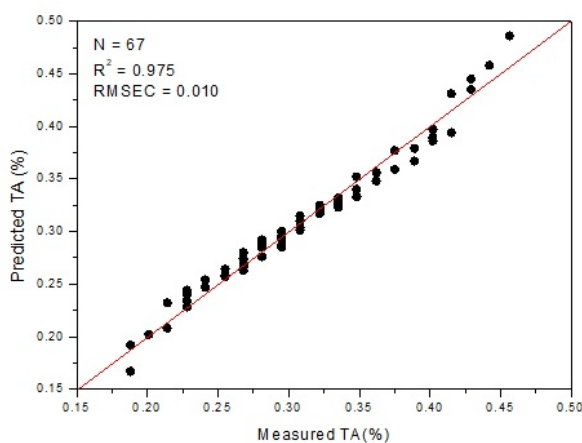
ตาราง 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity)

Set	TA				
	N	F	R^2	RMSEC (%)	RMSEP (%)
Calibration	67	7	0.975	0.01	-
Prediction	33	7	0.972	-	0.01

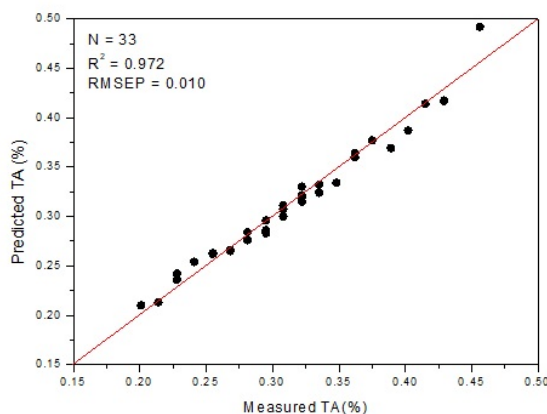
N= samples, F= factor, R^2 = coefficient of determination, RMSEC = root mean square error of calibration, RMSEP = root mean square error of prediction

เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมมาสร้างสมการในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity) ด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) ด้วยโปรแกรม Unscrambler ในตาราง 4.3 จะเห็นว่า กลุ่มสร้างสมการ ค่า $R^2 = 0.975$, RMSEC = 0.01% .และในกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ ค่า $R^2 = 0.972$, RMSEP = 0.01% ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าสามารถทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพดี

ภาพที่ 4.6 แผนการกระจายในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity) ในกลุ่มสร้างสมการ (a) และในกลุ่มทดสอบสมการ (b) จะเห็นว่าแผนการกระจายข้อมูลจะแสดงค่าปริมาณกรดที่วัดได้และค่าที่ทำนายปริมาณกรดได้นั้น จะมีลักษณะของกราฟควรรอยใกล้เคียงกับเส้น 45 องศา เพื่อประสิทธิภาพที่ดีและความแม่นยำที่สูงที่สุดของการทำนาย



(a)



(b)

ภาพที่ 4.6 แผนการกระจายในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรท (titratable acidity) ได้ในกลุ่มสร้างสมการ (a) และในกลุ่มทดสอบสมการ (b)

4.3 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids)

สำหรับการสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) จะใช้ตัวอย่างของฝรั่งทั้งหมด 100 ตัวอย่าง ในการสร้างสมการจะต้องมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) จะต้องมียุคสูงสุดและต่ำสุด จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่า มีจำนวนตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการ 67 ตัวอย่าง และจำนวนตัวอย่างในกลุ่มทดสอบสมการ 33 ตัวอย่าง โดยในกลุ่มสร้างสมการมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) อยู่ในช่วง 6.9-11.9 °Brix และในกลุ่มทดสอบสมการมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) อยู่ในช่วง 7.0-11.49 °Brix

ตาราง 4.4 ค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids)

	TSS (°Brix)	
	Calibration set	Prediction set
Number of samples	67	33
Range	6.9-11.9	7.0-11.4
Mean	8.7	8.7
Standard deviation	1.02	0.99

ตาราง 4.5 ความแม่นยำสำหรับการสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) ด้วยวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ

Spectral pretreatments	N	F	R ²	RMSECV (°Brix)
1) Original	67	12	0.707	0.573
2) Smoothing	67	14	0.660	0.592
3) MSC	67	12	0.610	0.662
4) 1 st Derivative	67	1	0.651	0.627
5) 2 nd Derivative	67	3	0.091	0.994
6) SNV	67	14	0.634	0.632
7) Smoothing+MSC	67	13	0.474	0.762
8) Smoothing+1 st Derivative	67	8	0.623	0.655

9) Smoothing+2 nd Derivative	67	5	0.042	0.994
10) Smoothing+SNV	67	12	0.589	0.649
11) MSC+1 st Derivative	67	12	0.465	0.757
12) MSC+2 nd Derivative	67	4	0.143	0.959
13) MSC+SNV	67	15	0.632	0.617
14) 1 st Derivative+2 nd Derivative	67	5	0.041	1.016
15) 1 st Derivative+SNV	67	12	0.589	0.650
16) 2 nd Derivative+SNV	67	2	0.189	0.930

F=Factors, N= number of samples, R^2 = coefficient of determination, RMSECV= root mean square error of cross validation, smoothing = Savitzky-Golay smoothing, 1st derivative = Savitzky-Golay first derivative differentiation, MSC = multiplicative scatter correction, 2nd derivative = Savitzky-Golay second derivative differentiation, SNV = standard normal variate transformation

ทำการปรับแต่งสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตรด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสมการโมเดล โดยวิธีการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ได้แก่ Smoothing, MSC, 1st Derivative, 2nd Derivative, SNV และการผสมระหว่าง Smoothing + MSC, MSC + 1st Derivative, 1st Derivative+2ndDerivative เป็นต้น ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4.4 จากตาราง 4.4 พบว่าการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดั้งเดิมให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ $R^2 = 0.707$ และ RMSECV = 0.573 °Brix

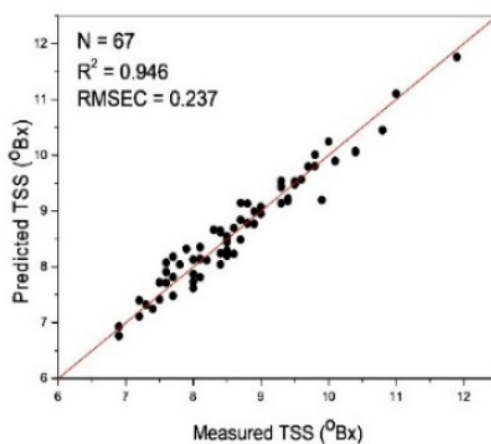
ตาราง 4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids)

Set	TSS				
	N	F	R^2	RMSEC (°Brix)	RMSEP (°Brix)
Calibration	67	12	0.946	0.237	-
Prediction	33	12	0.801	-	0.437

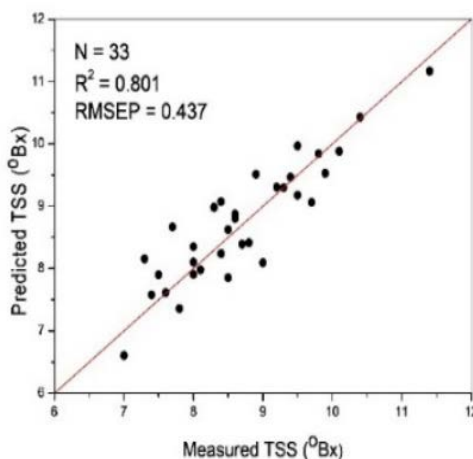
N= samples, F= factor, R^2 = coefficient of determination, RMSEC = root mean square error of calibration, RMSEP = root mean square error of prediction

เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมมาสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) ด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) ด้วยโปรแกรม Unscrambler ในตาราง 4.6 จะเห็นว่า กลุ่มสร้างสมการ ค่า $R^2 = 0.946$, $RMSEC = 0.237$ °Brix . และในกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ ค่า $R^2 = 0.801$, $RMSEP = 0.437$ °Brix ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าสามารถทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพดี

ภาพที่ 4.7 แผนการกระจายในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) ในกลุ่มสร้างสมการ (a) และในกลุ่มทดสอบสมการ (b) จะเห็นว่าแผนการกระจายข้อมูลจะแสดงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) ที่วัดได้และค่าที่ทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) ได้ นั้น จะมีลักษณะของกราฟควมอยู่ใกล้กับเส้น 45 องศา เพื่อประสิทธิภาพที่ดีและความแม่นยำที่สุดของการทำนาย



(a)



(b)

ภาพที่ 4.7 แผนการกระจายในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solids) ได้ในกลุ่มสร้างสมการ (a) และในกลุ่มทดสอบสมการ (b)

4.4 การสร้างสมการในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness)

สำหรับการสร้างสมการในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) จะใช้ตัวอย่างของฝรั่งทั้งหมด 100 ตัวอย่าง ในการสร้างสมการจะต้องมีค่าค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) จะต้องมามีค่าสูงสุดและต่ำสุด จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่า มีจำนวนตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการ 93 ตัวอย่าง และจำนวนตัวอย่างในกลุ่มทดสอบสมการ 45 ตัวอย่าง โดยในกลุ่มสร้างสมการมีค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) อยู่ในช่วง 3.21-8.48 N และ ในกลุ่มทดสอบสมการมีค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) อยู่ในช่วง 3.98-8.20 N

ตาราง 4.7 ค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness)

	firmness (N)	
	Calibration set	Prediction set
Number of samples	93	45
Range	3.21-8.48	3.98-8.20
Mean	5.61	5.77
Standard deviation	0.97	1.20

ตาราง 4.8 ความแม่นยำสำหรับการสร้างสมการในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) ด้วยวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตรด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ

Spectral pretreatments	N	F	R ²	RMSECV (N)
1) Original	93	12	0.622	0.592
2) Smoothing	93	11	0.546	0.650
3) MSC	93	12	0.584	0.624
4) 1 st Derivative	93	9	0.548	0.641
5) 2 nd Derivative	93	6	0.351	0.767
6) SNV	93	12	0.582	0.620
7) Smoothing+MSC	93	13	0.549	0.651
8) Smoothing+1 st Derivative	93	8	0.531	0.664
9) Smoothing+2 nd Derivative	93	5	0.360	0.769
10) Smoothing+SNV	93	12	0.556	0.648
11) MSC+1 st Derivative	93	8	0.485	0.679

12) MSC+2 nd Derivative	93	6	0.257	0.816
13) MSC+SNV	93	11	0.596	0.613
14) 1 st Derivative+2 nd Derivative	93	3	0.202	0.853
15) 1 st Derivative+SNV	93	8	0.505	0.675
16) 2 nd Derivative+SNV	93	15	0.321	0.803

F= Factors, N= number of samples, R^2 = coefficient of determination, RMSECV= root mean square error of cross validation, smoothing = Savitzky-Golay smoothing, 1st derivative = Savitzky-Golay first derivative differentiation, MSC = multiplicative scatter correction, 2nd derivative = Savitzky-Golay second derivative differentiation, SNV = standard normal variate transformation.

ทำการปรับแต่งสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตรด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสมการโมเดล โดยวิธีการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ได้แก่ Smoothing, MSC, 1st Derivative, 2nd Derivative, SNV และการผสมระหว่าง Smoothing + MSC, MSC + 1st Derivative, 1st Derivative+2ndDerivative เป็นต้น ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4.8 จากตาราง 4.8 พบว่าการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดั้งเดิมให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ $R^2 = 0.622$ และ RMSECV = 0.592 N

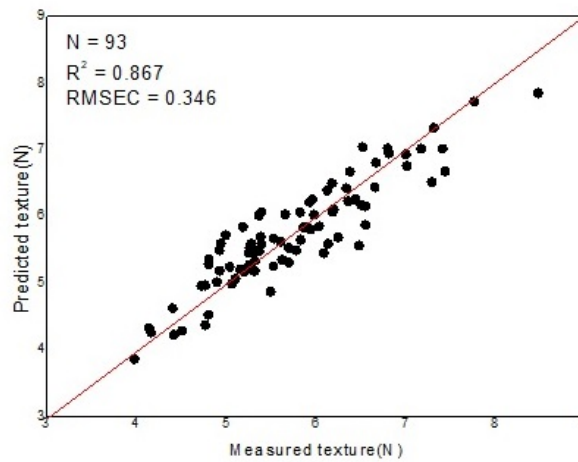
ตาราง 4.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness)

Set	firmness				
	N	F	R^2	RMSEC (N)	RMSEP (N)
Calibration	93	12	0.867	0.346	-
Prediction	45	12	0.747	-	0.610

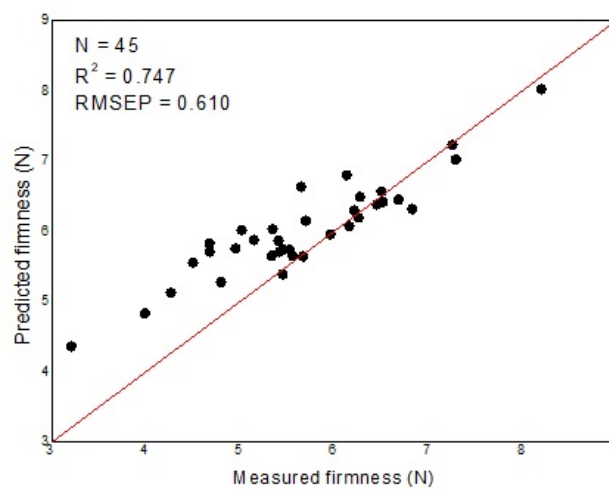
N= samples, F= factor, R^2 = coefficient of determination, RMSEC = root mean square error of calibration, RMSEP = root mean square error of prediction

เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมมาสร้างสมการในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) ด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) ด้วยโปรแกรม Unscrambler ในตาราง 4.9 จะเห็นว่า กลุ่มสร้างสมการ ค่า $R^2 = 0.867$, RMSEC = 0.346 N. และในกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ ค่า $R^2 = 0.747$, RMSEP = 0.610 N ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าสามารถทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพดี

ภาพที่ 4.8 แผนการกระจายในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) ในกลุ่มสร้างสมการ (a) และในกลุ่มทดสอบสมการ (b) จะเห็นว่าแผนการกระจายข้อมูลจะแสดงค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) ที่วัดได้และค่าที่ทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) ได้นั้น จะมีลักษณะของกราฟควรอยู่ใกล้กับเส้น 45 องศา เพื่อประสิทธิภาพที่ดีและความแม่นยำที่สุดของการทำนาย



(a)



(b)

ภาพที่ 4.8 แสดงแผนการกระจายในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของฝรั่ง (firmness) ในกลุ่มสร้างสมการ (a) และในกลุ่มทดสอบสมการ (b)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเรื่อง การทำนายคุณภาพของฝรั่งแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดชนิดความละเอียดสูง (non-destructive prediction of guava's qualities using NIR hyperspectral imaging) โดยฝรั่งทั้งหมดจะถูกสแกนโดยใช้เครื่อง NIR hyperspectral imaging โหมด reflectance ในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตรและนำข้อมูลสเปกตรัมมาสร้างสมการในการทำนายคุณภาพของฝรั่ง ได้แก่ ทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรท (titratable acidity), ทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของฝรั่ง (total soluble solids) และ ทำนายค่าความแน่นเนื้อ (firmness) โดยใช้เทคนิค partial least squares regression (PLSR) ด้วยโปรแกรม Unscrambler สามารถสรุปได้ดังนี้

การทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity) พบว่าการใช้ข้อมูลวิธีแบบดั้งเดิมให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยสมการที่สร้างนั้นสามารถทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ titratable acidity ได้ผลที่ดีและแม่นยำ โดยดูได้จากค่า $R^2 = 0.972$ ค่า RMSEP(%) = 0.01

ในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (total soluble solids) พบว่าการใช้ข้อมูลวิธีแบบดั้งเดิมให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยสมการที่สร้างนั้นสามารถทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (total soluble solids) ได้ผลในการทำนายที่ดีในระดับหนึ่งเท่านั้น โดยดูได้จากค่า $R^2 = 0.801$ ค่า RMSEP(°Brix) = 0.437

ในการทำนายค่าความแน่นเนื้อ (firmness) พบว่าการใช้ข้อมูลวิธีแบบดั้งเดิมให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยสมการที่สร้างนั้นสามารถทำนายค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ได้ผลในการทำนายที่ดีในระดับหนึ่งเท่านั้น โดยดูได้จากค่า $R^2 = 0.747$ ค่า RMSEP(N) = 0.610

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพื่อเพิ่มความสามารถและประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการให้สูงขึ้น ควรทำการเก็บตัวอย่างให้มีปริมาณมากยิ่งขึ้นและควรควบคุมอุณหภูมิในการเก็บรักษาให้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิอาจจะมีผลต่อคุณลักษณะของฝรั่ง

บรรณานุกรม

- ณัฐกานต์ นวเศรษฐวิสูตร, นงนุช เจริญवासุนตร์, วารุณี ณะแพสย์ และธงชัย สุวรรณสิขณณ์. 2546. การตรวจสอบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของฝรั่งพันธุ์กลมสาละด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด. รายงานการประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร ครั้งที่5. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทคบางนา, กรุงเทพฯ. ธงชัย สุวรรณสิขณณ์. 2545 การวิเคราะห์สเปกตรัม NIR ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ. การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร: 99 – 129
- นฤมล มานีพพาน. 2539. การเพาะปลูกและการขยายพันธุ์ฝรั่ง. สำนักพิมพ์ส่งเสริมอาชีพธุรกิจ. กรุงเทพมหานคร.80 หน้า.
- นิพนธ์ ดังคมนาอนุรักษ์. 2545. หลักพื้นฐานเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร: 39 – 66.
- นิมิตตรา ไชยรัตน์โชติ. 2559. การใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และเทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมในการ ติดตามคุณภาพภายในและปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยศิลปากร
- ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2559. การวัดความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหาร. สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด มีน เซอร์วิส ซัพพลาย. กรุงเทพมหานคร, 509 หน้า
- ปานมนัส ศิริสมบุรณ์ และ ประสันต์ ชุ่มใจหาญ. 2555. RMSEC (Root Mean Square Error of Cross Validation). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://nirsresearch.com/NP-24024-3.html>. [2 พฤษภาคม 2562].
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. 2549. Texture analysis. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0524/texture-analysis>. [2 พฤษภาคม 2562].
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์.. 2556. Titratable acidity / ความเป็นกรดจากการไทเทรต. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3219/titratable-acidity>. [2 พฤษภาคม 2562].

- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมวงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. 2556.Total Soluble Solids / ของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0997/total-Soluble-solid>.
 [2 พฤษภาคม 2562].
- รณฤทธิ์ ฤทธิธรม, ปนัดดา ไกรลาศโอฬาร และมัมมัญญา อึ้งพานิช. 2551. การประเมินคุณภาพของผลฝรั่งแบบไม่ทำลายเพื่อการค้าในเชิงพาณิชย์. วิทยาศาสตร์เกษตร 39(3), 70-73.
- รุ่งเกียรติ แก้วเพชร. 2559. แนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตฝรั่งอินทรีย์: กรณีศึกษาเกษตรกรผู้ปลูกฝรั่ง ตำบลคลองจินดา อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- วรศักดิ์ สมตน. 2558. การทำนายระดับความสุกของเนื้อทุเรียนโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิศรุต บุญช่วย. 2553. การตรวจสอบความหวานของแตงโมพร้อมบริโภครวมโดยไม่ทำลายที่เก็บเกี่ยวในฤดูฝนด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สดุดี ผลมะขาม. 2558. การตรวจสอบคุณภาพของมะขามชนิดพันธุ์ทุลเกล้าด้วยเทคนิค เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สร้อยดี เพ็ญสกลนธ์. 2541. สวนฝรั่ง. สำนักพิมพ์ฐานเกษตรกรรม. นนทบุรี. 63 หน้า.
- สินีนารถ สุขทนารักษ์. 2556. การตรวจสอบคุณภาพภายในของมะขามหวานแบบไม่ทำลาย โดยใช้เทคนิคแสงย่านใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุวดี น้าพาเจริญ และชลทิชา จำรัสพร. 2558. R-Squared. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:
<https://www.solutioncenterminitab.com>. 2 พฤษภาคม 2562.
- อภิชาติ ศรีสะอาด. 2542. ฝรั่งเงินล้าน. บริษัทนาคาอินเตอร์มีเดีย. กรุงเทพมหานคร. 122 หน้า.
- Agricultural Informatics Center of Agricultural Economics. 2017. Agricultural trade statistics. Retrieved May 2, 2019, from <http://www.oae.go.th>.
- AOAC International. 2000. Official Methods of Analysis of AOAC. International. 17th ed AOAC. International, Arlington, USA.
- Cobo-Medina, Li.B., Lecourt, M., Harrison, J., Harrison, N., R.J. and Cross, J.V. 2018. Application of hyperspectral imaging for nondestructive measurement of plum quality attributes. Journal of Postharvest Biology and Technology, 141, 8-15.

- He, H. J., Wu, D. and Sun, D. W. 2014. Rapid and non-destructive determination of drip loss and pH distribution in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets using visible and near-infrared (Vis-NIR) hyperspectral imaging. *Journal of Food Chemistry*, 156, 394-401.
- He, H. J. and Sun, D. W. 2015. Hyperspectral imaging technology for rapid detection of various microbial contaminants in agricultural and food products. *Journal of Trends in Food Science & Technology*, 46, 99-109.
- Meijun, S., Dong, Z., Li, L. and Zheng, W. 2017. How to predict the sugariness and hardness of melons: A near-infrared hyperspectral imaging method. *Journal of Food Chemistry*, 218, 413-421.
- Rungpichayapichet, P., Nagle, M., Yuwanbun, P., Khuwijitjaru, P., Mahayothee, B. and Muller, J. 2017. Prediction mapping of physicochemical properties in mango by hyperspectral imaging. *Journal of Biosystems Engineering*, 159, 109-120.
- Suktanarak, S. and Teerachaichayut, S. 2017. Non-destructive quality assessment of hens' eggs using hyperspectral images. *Journal of Food Engineering*, 215, 97-103.
- Teerachaichayut, S. and Huong, T.H. 2017. Non-destructive prediction of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes by near infrared hyperspectral imaging. *Journal of Postharvest Biology and Technology*, 133, 20-25.
- U.S. Department of Agriculture. 2019. Guava, raw. Retrieved May 2, 2019, from <https://fdc.nal.usda.gov/food-details/341568/nutrients>.
- William, P.C. and Norris, K.H. 2001. *Near-Infrared Technology in Agricultural and Food Industries*. 2nded. American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, Minnesota, USA.
- Williams, P. 2007. *Near Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology*, Ed by Ozaki, Y., Fred McClure, W., Christy, A.A. Wiley Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., USA. p. 165.
- Workman, J., and Weyer, L. 2012. *Practical guide and spectral atlas for interpretive near-infrared spectroscopy*. 2nd ed. Taylor & Francis Group, LLC, USA.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

1. การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ ด้วยเครื่อง refractometer รุ่น PAL-1

- 1.1 ฝรั่งมาหั่นให้ง่ายต่อการปั่น
- 1.2 นำไปปั่น โดยใช้เครื่องปั่นน้ำแยกกาก
- 1.3 กรองน้ำฝรั่งกับกากฝรั่งโดยใช้ผ้าขาวบาง
- 1.4 นำน้ำฝรั่งมาทดสอบกับเครื่อง refractometer โดยก่อนนำน้ำฝรั่งมาทดสอบโดยเครื่อง refractometer หยดน้ำกลั่นลงในรูวัดค่าเพื่อ calibrate อุปกรณ์ กดปุ่ม start ค่าที่ได้จะต้องเป็น 0.00 ก่อน แล้วเช็ดออกให้แห้ง
- 1.5 หลังจากนั้นจึงหยดน้ำฝรั่งที่ได้จากการกรองลงไป กด start เพื่ออ่าน ค่าที่ได้โดยวัดทั้งหมด 3 ครั้ง
- 1.6 จดบันทึกทุกครั้ง

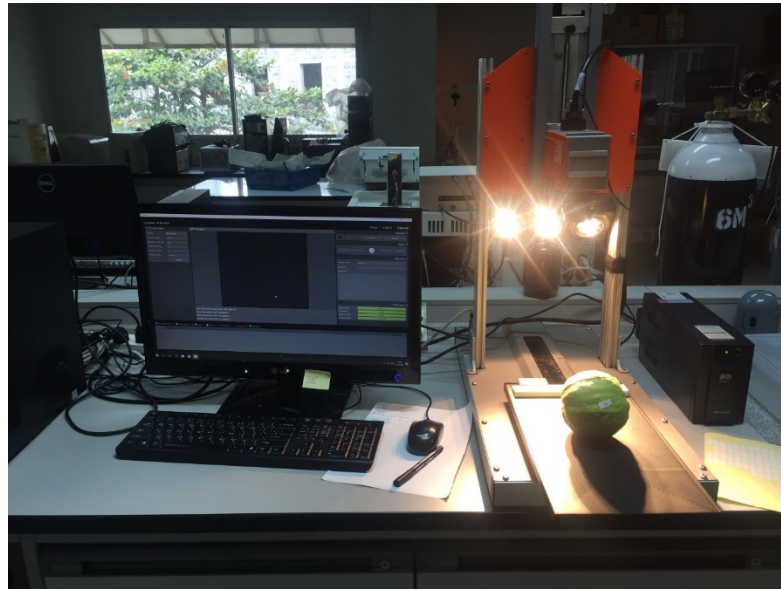
2. วัดปริมาณกรดที่ไตเตรทได้

- 2.1. ใช้น้ำคั้น 5 มิลลิลิตร
- 2.2. นำมาไทเทรตกับสารละลาย NaOH (sodium hydroxide) ความเข้มข้น NaOH 0.1M
- 2.3. ใช้ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalene) 1% เป็นอินดิเคเตอร์จำนวน 3 หยด
- 2.4. ไทเทรตจนเกิดสีชมพูอ่อน โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ยและคำนวณหาปริมาณกรดที่ ไทเตรทได้จากสูตร

$$\text{TA citric acid (\%)} = \frac{\text{ปริมาตร NaOH (ml)} \times \text{ความเข้มข้นของ NaOH (N)} \times 0.064 \times 100}{\text{ปริมาตรน้ำฝรั่งที่คั้น}} \quad (1)$$

*** milliequivalent of citric (anhydrous) = 0.064

ภาคผนวก ข
ขั้นตอนการทดลอง



ภาพที่ ข1 การวัดด้วย NIR hyperspectral imaging รุ่น Specim Fx17



ภาพที่ ข2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง texture analysis รุ่น Specim Fx17



ภาพที่ ข3 การปั่นน้ำฝรั่งโดยใช้เครื่องแยกกาก



ภาพที่ ข4 การกรองน้ำฝรั่งโดยใช้ผ้าขาวบาง



ภาพที่ ค5 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้(total soluble solid, TSS)
โดยใช้เครื่อง digital refractometer

ประวัตินักวิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว ณิชฐิณี กลิ่นบำรุง
วัน เดือน ปีเกิด	25 มิถุนายน 2538
ที่อยู่	63/18 หมู่5 ตำบล บางนมโค อำเภอสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13110
ประวัติการศึกษา	2561 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) คณะอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง 2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) คณะอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัย	Klinbumrung, N. and Teerachaichayut, S. 2018. “Quantification of acidity and total soluble solids in guavas by near infrared hyperspectral imaging. ” In International Conference on Advanced Material Engineering&Technology ICAMET) Ho Chi Minh, Vietnam, 2018